

Couplages entre tectonique et processus de surface dans les orogènes à l'échelle du cycle sismique.

Rodolphe Cattin¹, Martine Simoes², Philippe Steer³

Les tremblements de Terre sont sans doute l'un des phénomènes les plus catastrophiques associés à la dynamique de notre planète. Leur occurrence peut être associée d'une part au chargement lent et progressif des failles dû au mouvement des plaques tectoniques, mais également à la proximité d'autres séismes qui peuvent localement provoquer une déstabilisation du milieu. Les séismes sont classiquement interprétés dans le cadre de la théorie du cycle sismique (Fig. 1). La période asismique, correspondant au chargement séculaire des contraintes sur le plan des failles, est appelée période inter-sismique. Sa durée, entre 50 et 1000 ans, dépend du contexte géodynamique et notamment de la vitesse de chargement. La phase co-sismique correspond au séisme, *i.e.* à la phase de nucléation et de propagation de la rupture sismique. La période de temps associée est extrêmement courte et varie suivant les séismes entre quelques secondes à plusieurs minutes pour les mégatremblements de terre comme celui de Sumatra en 2004 ou plus récemment celui du Japon en 2011. Enfin, suite à la rupture sismique, on considère une phase post-sismique qui correspond à un réajustement mécanique rapide du milieu qui peut s'effectuer sur plusieurs semaines, mois ou même années. La courte échelle de temps des observations sismologiques ou géodésiques (<100 ans) par rapport à la durée d'un cycle sismique (plusieurs centaines d'années) est un facteur limitant. Ainsi, aucun cycle sismique complet n'a pour l'instant pu être documenté.

A plus grande échelle de temps (~1-100 Ma), de nombreuses études ont permis de mettre en évidence le rôle clé joué par les processus de surface dans la dynamique orogénique. Des modèles numériques (e.g. Burov & Avouac, 1996 ; Willett et al., 1999) ou analogiques (Konstantinovskaia & Malavieille, 2005) ont ainsi montré que la formation et la relaxation des reliefs continentaux est dictée par la compétition et les interactions entre la dynamique des enveloppes internes de la Terre, les processus de surface et le climat. A plus courte échelle de temps (~1-100 ka), l'analyse de l'effet de la tectonique et des rivières sur l'évolution des

¹ Géosciences Montpellier, Université Montpellier II - CNRS UMR5243, 34090 Montpellier, France

² Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Univ. Paris Diderot, UMR 7154 CNRS, F-75005 Paris, France.

³ Department of Earth Science, Bergen University, Bergen N-5007, Norway. Now at Géosciences Rennes, CNRS UMR 6118, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex, France

paysages a fait également l'objet de plusieurs études analogiques (e.g. Gravelleau et al., 2012). L'incision des rivières est d'ailleurs classiquement exploitée comme marqueur de la déformation récente et du glissement moyen sur les failles actives (Lavé & Avouac 2000 ; Lavé & Avouac 2001). Les processus de surface sont associés à des mécanismes impliquant de courtes échelles de temps comparables à celles des différentes phases du cycle sismique. Malgré cela, les interactions entre processus de surface et tectonique restent peu étudiées à l'échelle du cycle sismique. Pourtant certaines de ces interactions sont bien connues : déstabilisation de pente liée aux séismes, évolution d'un escarpement de faille, formation de la topographie. De nombreuses questions restent donc totalement ouvertes : Comment érosion et déformation tectonique interagissent-elles à ces courtes échelles de temps ? Plus largement, quels sont les couplages entre processus de surface et tectonique à l'échelle du cycle sismique ? Ces couplages peuvent-ils biaiser la mesure de la déformation tectonique, et donc l'estimation de l'aléa sismique ?

Bilan topographique d'un séisme

Les séismes participent de manière axiomatique à la formation des reliefs des chaînes de montagnes (Avouac, 2008). Toutefois, du fait de l'érosion – incision fluviale et mouvements gravitaires – induite par l'accélération et les déplacements co-sismiques, ils contribuent aussi indirectement à la destruction de ces reliefs (Dadson et al., 2003, 2004 ; Hovius et al., 2011 ; Parker et al., 2011). A l'échelle du co- et post-sismique, le bilan topographique net d'un séisme de forte magnitude (i.e. surrection co-sismique moins érosion induite) n'a été que rarement réalisé. Des résultats obtenus récemment indiquent un bilan légèrement positif pour le séisme de ChiChi en 1999 (Hovius et al., 2011), ou négatif pour le séisme de Wenchuan en 2008 (Parker et al., 2011), reposant de ce fait la question de la contribution réelle des séismes à la construction des reliefs. Par ailleurs, l'augmentation brutale des taux d'érosion observée lors des séismes de forte magnitude peut théoriquement induire un rechargement des contraintes sur le plan de faille et ainsi raccourcir le temps de récurrence du prochain grand séisme. Bien que non documentée actuellement, une telle rétroaction positive serait favorisée par un transport sédimentaire efficace avec une période caractéristique plus courte que le temps de récurrence des séismes. Cela pourrait être le cas lors du séisme de ChiChi en 1999, pour lequel les flux sédimentaires associés augmentent brutalement suite au séisme et ne retrouvent des niveaux comparables à ceux observés en moyenne avant le séisme que ~6-8 ans après.

Chargement intersismique et transfert de masse en surface

De telles interactions sont-elles aussi imaginables lors du chargement intersismique des failles ? Cattin & Avouac (2000) ont montré sur la base d'une modélisation thermo-mécanique que l'érosion en Himalaya contribuait de manière significative à la déformation observée pendant la période intersismique. Ils réconcilient notamment les données de déformation intersismique horizontale et verticale en considérant qu'une partie du soulèvement intersismique mesuré est dû à la réponse isostatique à l'érosion (Fig 2). Ces résultats suggèrent que négliger l'érosion peut induire une mauvaise estimation du chargement intersismique des failles actives (en termes de géométrie et de glissement sur les failles) et donc de l'aléa sismique associé. De plus le transfert de masse lié à l'érosion aura pour effet de réduire significativement la contrainte normale sur les chevauchements à faible pendage entraînant une déstabilisation de ces failles.

Conclusion

L'érosion est donc un processus non négligeable à courte échelle de temps. Une meilleure documentation des flux sédimentaires pendant et après un séisme serait nécessaire pour permettre de mieux quantifier les effets mécaniques sur le rechargement des failles induis par cette redistribution de masse en surface. Dans tous les cas, il semblerait que l'étude du chargement inter-sismique des failles actives en contexte orogénique ne puisse se faire de manière rigoureuse avec les modèles classiquement utilisés: prendre en compte une rhéologie crustale plus réaliste ainsi que les processus de surface s'avèrent nécessaire à une meilleure estimation de l'aléa sismique.

Figure

Figure 1 : Déformations associées au cycle sismique et au processus de surface. La période co-sismique correspond à la rupture le long d'un plan de faille. Elle est suivie d'une relaxation post-sismique associée à des glissements asismiques et/ou aux propriétés poro-élastiques ou visqueuses de la croûte terrestre. Le chargement inter-sismique de la faille est lent et progressif et peut durer plusieurs siècles. Les transferts de masse associés aux processus de surface et au climat ont également un rôle sur les déplacements : l'érosion et la sédimentation induisant respectivement des déplacements vers le haut et vers le bas.

Figure 2 : Rôle de l'érosion sur les déplacements verticaux au travers de la chaîne himalayenne modifiée d'après Cattin & Avouac (2000). L'intensité de l'érosion affecte aussi bien l'incision fluviale calculée (représentée par les courbes de couleur) que les vitesses verticales inter-sismiques mesurées par nivellement.

Référence

- Avouac, J.P. & Burov E.G., Erosion as a driving mechanism of intracontinental growth? *J. Geophys. Res.*, 101, (8) 17747-17769, 1996.
- Avouac, J.P., Dynamic Processes in Extensional and Compressional Settings - Mountain Building: From Earthquakes to Geological Deformation, *Treatise on Geophysics*, 6, 377 - 439, 2008.
- Cattin, R. & Avouac, J.P. Modeling mountain building and the seismic cycle in the Himalaya of Nepal. *J. Geophys. Res.*, 105, 13,389-13,407, 2000
- Dadson, S.J. et al., Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature*, 426: 648-651, 2003.
- Dadson, S.J. et al., Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt. *Geology*, 32(8): 733-736, 2004.
- Graveleau F. et al., Experimental modelling of orogenic wedges: A review, *Tectonophysics*, 538-540: 1-66, 2012.
- Hovius, N. et al., Prolonged seismically induced erosion and the mass balance of a large earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, 304 (3-4). pp. 347-355, 2011.
- Konstantinovskaia, E. & Malavieille, J., Erosion and exhumation in accretionary orogens : Experimental and geological approaches, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(2), doi :10.1029/2004GC000794, 2005.
- Lavé J. & Avouac, J.P., Active folding of fluvial terraces across the Siwalik Hills (Himalaya of central Nepal, *J. Geophys. Res.*, 105, 5735-5770, 2000.
- Lavé J. & Avouac J.P., Fluvial incision and tectonic uplift across the Himalayas of Central Nepal, *J. Geophys. Res.*, 106, 26,561-26,592, 2001.
- Parker, R.N. et al., Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake greater than orogenic growth. *Nature Geoscience*. 2011.
- Willet, S. D., Orogeny and topography : The effects of erosion on the structure of mountain belts, *J. Geophys. Res.*, 104 (B12), 28,957-28,981, doi :10.1029/1999JB900248, 1999.

Figure 1

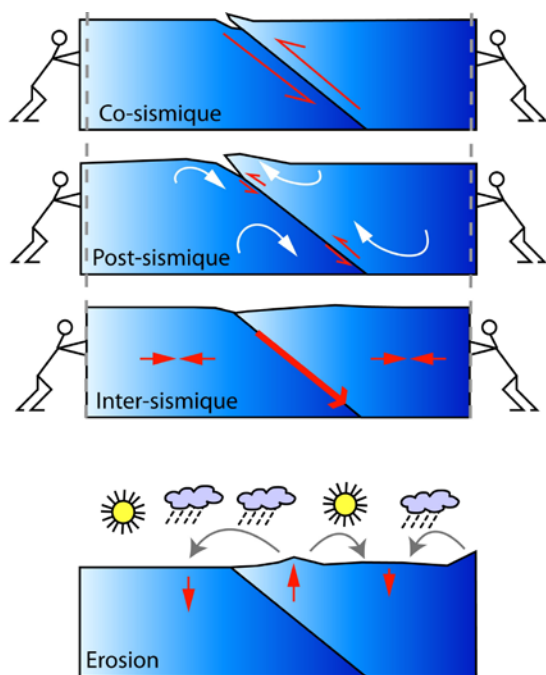


Figure 2

